

整流子(集電環)接觸表面被膜の考察

藤 宗 寛 治 , 北 野 明

Contact Surface Film of Commutators (or Slip Rings)

Hiroharu FUJISO , Akira KITANO

It is well known that the faculty of D.C. machines are greatly depend upon the performance of commutation. In design, operation and controll, commutation is essentially difficult and contains a lot of troublesome problems. Still now, many papers on the commutation had been reported. But we know that our knowledge about commutation is narrow and shallow.

It had already been known that a cuprous film developed on the sliding surface between brushes and commutator.

During the 11nd world war, it has been found that the rapid wear of brushes under high altitude conditions came about. Then, the importance of sliding contact surface, surface films, and its roles to the commutation were recognized.

In this paper, we shall briefly describe its character, construction, developement and dissipation of the sliding contact surface film.

緒 言

直流機は其の整流電圧降下の低いこと、回転力の優れて居ること、速度の調整が的確容易であること等で多方面に利用されて居るが、最近電子装置を含む各種整流器の発達に伴つて其の重要性が著しく増大されたように見える。然るに其の整流問題は設計に於ても取扱いに於ても本質的に厄介なものである。

従来この問題については整流理論⁽¹⁾整流の改善⁽²⁾、電気刷子の研究^(3,4,5)等数多のものが報告されている。しかし何れも隔靴搔痒の感があり吾人を釈然たらしむるものが見当らない。

第二次世界大戦中に米陸軍戦闘機が高々度に於て電刷子が異状磨耗の事故を起した。その対策の為に熱心な研究が展開され、特に整流子表面皮膜の解明に努力が向けられた。これは整流問題に新なる視野を開くに至つたものと見られ、筆者等も多大の共感を覚えしめられた所である。

実際新らしく製作された直流機が整流子の所謂「ならし」の為に、予備運転が必要であつたり、長く放置された整流子を有する直流機が起動困難なことがあつたりすることも運転保守の環境の変化が直流機の性能に影響を及ぼすことで共に整流子被膜の効果を示唆して居るものと云へよう。

一般に良好な整流とは整流子と刷子との間に火花の発生が少く焼損等の起らぬのを云うのであるが、それ等の問題は従来電氣的、機械的には相当詳細に探究されているように見える。整流子表面に生じた酸化銅が刷子により削り取られ、これが周囲の水蒸気や酸素、ハロゲン等の存在によつて回復されたり除去されたりして整流に影響を及ぼすことについては前述した通り色々の研究がなされた。これは整流問題解明の新らしい視野と云へよう。こゝではこれ等に基いて其の皮膜の構成、環境による変化、性能等につき考察してみることとする。

1. 整流子表面被膜の一般的考察

1936年 Baker⁽⁶⁾は 整流子と刷子の接触により生ずる接触表面被膜について研究し、之が酸化銅より成り厚さは $3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$ cm であろうと報告し整流子表面被膜の定量的研究の端緒を開いた。次いで 1937年 Hessler は此の被膜を化学的に定量分析した。この結果は第1表の如くであつた。

第 1 表

	Percentage	Weight(g/cm ²)	Average Thickness	
			mm	Å
Cu ₂ O	65.8	1.27×10^{-5}	2.1×10^{-5}	210
C	22.1	0.42×10^{-5}	3.3×10^{-5}	330
Residue SiO ₂ , Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ , CaO	12.1	0.24×10^{-5}		
	100.0	1.93×10^{-5}	5.4×10^{-5}	540

この表中平均厚さは酸化銅を 6.0, silica 及び carbon を夫々 2.0 とした大約の重量密度から算出したものである。1926年 Vernon⁽⁷⁾の研究によれば銅表面上の酸化銅被膜の厚さは 210Å であつた。

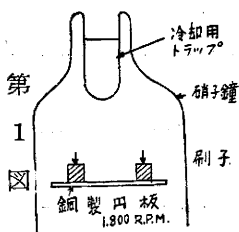
更に 1944年 Van Brunt と R. H. Savage⁽⁸⁾⁽⁹⁾はより精密に実験を行つた結果、膜の厚さは 5.4×10^{-5} cm 其の内酸化銅が 2.1×10^{-6} cm, 其の上面に 3.3×10^{-6} cm の黒鉛が存在すると報告している。其の分析及び Data から空気中で運転せられる整流子或は集電環と刷子との間には黒鉛が被膜として存在し大気中の水蒸気がその皮膜を通じて吸収され接触面の摩擦を低下し、潤滑剤の役割をなす事が明かにせられた。

D. Ramadanoff と S. W. Glass,⁽¹⁰⁾ H. M. Elsey⁽¹¹⁾ 等は高々度に於ける空気中の水蒸気の不足が航空機電機の刷子の磨耗を早める事を詳細に報告している。Martinez に依れば 40,000ft の高度に於ける水蒸気の量は毎立方呎 0.00075 粒以下で地表に於て刷子が良好な動作をなし長寿命である為には最小限毎立方呎 1½ 粒の水蒸気が必要であると言つている。それ故に高々度では大気が乾燥して居るので航空機用電機には格別の注意が払われねばならぬ。

特殊な環境例ば寒冷で湿度の低い地方や硫化ガスにさらされる場所等では其の為に整流不良を来し、逆に塩素ガスで整流が良好になつた例等も報告されている。H. M. Elsey⁽¹²⁾ はシリコン樹脂絶縁を施した潜水艦用電動機が普通定格の 40% 増で運転中刷子電圧降下が 2 倍も増加し、補極電流を合流して或る程度補正したが再び整流が悪化し遂に運転を中止するに至つた例を示して居る。この原因はシリコン絶縁ニスの蒸気が整流子面に好ましからざる被膜を作るものと判明した。其の後多数の実験の結果極めて微量のシリコンガス (1/1,000,000) でも普通以上に磨耗を大にし 200/1,000,000 とならば破壊的磨耗を起す事が実験的に確められた。

斯くの如く表面被膜は周囲状況に依つて影響される所が大なので此の方面の研究が一層要望された。

Van Brunt 及び R. H. Savage は次の様な方法で実験を進めている。第1図に示す様なガラス鐘内で垂直に廻転する Inductionmotor の廻転子に上仕上を施した銅製円板を取付け之に刷子が接触させてある。この刷子は予め摩擦力を補正した撥条で抑へられて圧力が調整出来る様になつている。又高々度に於ける接触面研究の為鐘内の空気圧は外部の真空ポンプで加減出来る様にしてある。使用した刷子は高さ 1.5cm 頂点面積 0.01in² の鉛筆様の円錐形のものであつた。通常大気圧下で 1,800R.P.M. で 1 時間廻転した時は磨耗は殆ど見られなかつた。廻転を止めた時静止迄の時間は 15 秒であつた。真空中では 5 分間廻転後で静止迄に 28 秒を要し更に同真空中で 2 分間廻転後では 7 秒で静止した。其の後 100R.P.M. の低速で廻転させようとしても廻転しなかつた。之は機械的摩擦が増大した為と思はれる。次に空気を入れると廻転子は瞬間的に加速され数秒で全速度に達した。開放して検査すると刷子は殆ど磨耗して了つていた。之は所謂 "Brush-dusting" に依



第 1 図

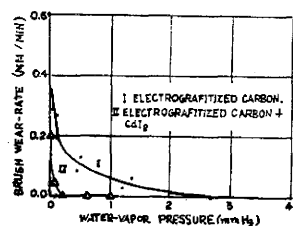
る損耗と考へられる。従来刷子磨耗に就ては刷子の成分や外部からの機械的接触条件等から研究されて来たが接触被膜や表面分子力等をも考察する必要があると思はれる。

通常、正常運転中の整流子或は集電環面は暗赤色の光沢を有している。之は刷子との間の適当な摩擦に依るもので“なじんだ面”と言はれている。真空中に於ける上記の実験では実験の最初から Graphite が急速に磨耗し高い摩擦を示したのでなくて刷子自体及び銅円板に吸着されているガス、特に水蒸気を取除いた結果高い摩擦を示したのであつた。此の水蒸気や他の吸着ガスを除く為十分注意して化学的に洗滌した後一時的に大電流 (30~95amp) を流して加熱した。此の際刷子の先端の電流密度は 10^6 amp/cm² にも達すると考へられるがこの過大電流で面上に傷を着けない様に Carbon block を刷子と集電環接触部に挿入して金属面上の電流密度を減少せしめた。以上の予備操作を行つた結果爾後は同条件では殆ど同一の結果が得られた。

2. 水蒸気のみが接触面に及ぼす効果

既に述べた様に真空中では刷子の磨耗度は非常に高いが圧力にして僅か数 mmHg の水蒸気を導入すると摩擦が減少し磨耗しなくなる。

之の水蒸気の効果を検べる為第1図の様な装置に一群の刷子と集電環を配置し更に不純物やガスを出来る丈取除いた水蒸気をガラス細管でその接触面に導入した。ガラス鍾頂部の冷却トラップには液体窒素を入れてその量で温度を調整した。内部圧力は水銀 manometer 及び bridge 回路と組合せた Pirani Gage を用ひて測定した。第2図は水蒸気圧力に対する磨耗度の変化を示したものである。此所では其程大きな時間の遅れや履歴 (hysteresis) は見られなかつた。之に依ると 3.5~10.mmHg では磨耗度は零である。



第 2 図

と考へられる。

水蒸気を凝結した時の残留ガス圧は大体 1.6×10^{-2} mmHg が CO₂, 9×10^{-3} mmHg が "NC" と算定された。残留ガスの除去は非常に困難で除去されなかつたが此の程度の圧力では磨耗度測定に害が無いと思はれる。

斯くして水蒸気が graphite と銅の接触面に潤滑剤の効果をも有するのである事が明かにされたが其の機構の説明には色々の問題があるものと考へられる。

3. 潤滑と潤滑剤

graphite は本来滑性的ではないが或物質が表面に吸着されると滑性を示す様になる。此の様な物質は graphite の潤滑剤と言へる。例へば大気中の水分は graphite の理想的な潤滑剤である。かくて地表に於ては大気が潤滑剤の供給源であつて適度の量を自動的に接触面全体に完全に供給している。所が高々度に於ては供給が困難となり期待する事が出来ず之に代るべき処置や対策が考へられた。先ず最初多孔性の Carbon 刷子を液体に浸潤して滑性を持たす事が試みられた。此の液体は蒸気圧が低く而も接触の際の熱に依つて電氣的、熱的絶縁が破壊されないものでなければならない。此の為従来銅に対する摩擦を下げる為に用いられた Paraffin や其の他の Wax 類が試用された。併し之等の有機物は潤滑剤としては良いが蒸発速度や接触損失の増大の為実用し得なかつた。

有機滑剤が失敗した後 L.W.Cubb に依つて Molybdenumsulphide が取り上げられた。之は固体滑剤としての道を拓いたものであつた。

Graphite 結晶の縁辺の硬度は相当高いと見做されているが滑剤が無い時はひどい擦傷の原因となる。其の為整流子或は集電環表面上の被膜が破壊されて行く。反対に滑剤が与へられる時には単一或は多層の被膜に被れるものと考へられる。

前述の Molybdenumsulphide で処理した刷子では特徴ある暗赤色の酸化銅被膜は発達しなかつたが整流子上に薄い sulphide の被膜を作つた。之の膜は銅に固着して面を防護しながら潤滑面として

働いた。併し間もなく接触熱や火花の為に Molybdenumsulphide が Molybdenumcarbide に変化して整流子に凹んだ傷を附けるに至つた。が兎に角固体に依つて滑性被膜が作られ十分実用し得る事が明かにされた。実用されたのは沃化鉛であるが此の軟い黄色の固体は Molybdenumsulphide の様に銅に固着した滑性の被膜を生ずるものと予期されたが実際は暗い縹子様光沢膜で通常の酸化銅被膜と様子が同じであつた。此の膜は低圧の酸素と水蒸気中でも面上に安定的に固着し刷子跡は綺麗な光沢があつた。之の理由として化学的に不安定な中間層の沃化銅が酸化銅に変化すると考へられる。此の解釈が正しいとすると整流子は酸素の含有の少ない気中や水蒸気のない所で、酸化が進む事になる。又一方沃度蒸気を未処理の刷子と整流子面に誘導して真空試験が実施されたが磨耗が減じ銅面上に酸化被膜を形成する事が明かにされた。かくて同族たる iodide, chloride, bromide, fluoride の複合物等の試験が行はれたが程度の差こそあれ同一傾向が示された。其等の内 iodide の複合物が一番熱的に不安定で fluoride 複合物は最も安定である。併し安定な fluoride copper は酸化の度合は緩慢であつた。

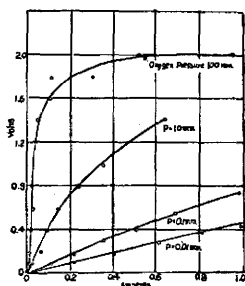
更に沃化物処理の刷子の水蒸気に対する敏感度の研究が進められたが、iodide cadmium 処理の刷子は $0.1 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ から $300 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ の範囲で非常に敏感である事が見出された。刷子は蒸気圧の上下に従つて磨耗を始めたり停止したりする。この圧力範囲は非処理の刷子の限界圧力に比べて遙に低いものである。

4. 接触面と接触電気抵抗

刷子接触面に於ける接触電気抵抗は 1936年 Baker が報告している。彼の報告の要点は接触面に於ける電気特性、即ち電圧対電流の非直線性は接触の際の酸化被膜に依るものだとしている。又種々の原因で面上に附着する汚れも大きな要素だと考へた。

其の後 Van Brunt は carbon-copper の接触電気特性の実験を行つた。汚れを防ぐ為念入な化学的洗浄の後表面を加熱して万全を期した。使用刷子は分光器用 Soft carbon で円錐状をなし頂点面積は 0.1 mm^2 であつた。彼の実験の結果に依ると普通大気中で運転の間に電圧対電流の比は漸次増加し、酸化被膜層の成長と関連がある様に思はれた。此の酸化被膜層は比較的安定でこの成長、発達には相当の時間を要するものと思はれる。被膜層が十分発達したと思はれる時には 1~3volt の間で比は飽和値に達し既に良く知られた非直線性曲線を成した。

次に真空試験では酸化被膜は酸素圧力に鋭敏であつた。接点に定電圧を加へ酸素圧に対する電気抵抗を測定すると指數的に増加した。第3図は 0.01 mmHg から 100 mmHg 迄の酸素圧力に対する電圧電流関係である。 10^{-2} mmHg 以下では正確に直線的である。これらの変化は速応且可逆的である。



第 3 図

又注意すべきは酸素は接触面が廻転運動する際に効果を及ぼし静止した面では影響を示さない。

以上の実験は低電圧の下で行はれたものであつて実際の負荷電流の変化に対して接触電圧降下が如何に変化するかについては示して居ない。唯現在の所接触抵抗の内容はほんの僅かしか知られて居らず今後に残された問題が多い事と考へられる。

5. 結 言

接触表面被膜の概要に附いて環況の及ぼす効果を定性的に取り上げて來たが水蒸気存在が最も重要な要素であり酸素及びハロゲン族蒸気も見逃し得ない役割をはたす事が明かにされた。定量的な考究も行はれているが複雑且デリケートな点が多く後日の研究に俟たねばならぬと思はれる。

又電氣的特性の方面から見た時実際に負荷した際の諸関係にも種々困難な問題があると考へられる。

併し整流の問題が整流子表面皮膜の解明によつて一層明らかにされようとして居ることは注目すべきことである。終りに恩師阿部清博士より種々御教示を頂き又学友西堀博士 並に同片岡高示氏より文献閲読に関し多大の便宜を供与せられたことに厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 安部 三郎 電学誌 昭15 2月 p.74
- (2) 渡辺 寧・山田俊夫 電学誌 昭12 11月 p.1035
- (3) 学振・小委員会 電気用刷子の研究(I) 昭15
- (4) " " " (II) 昭19
- (5) 一木 利信 日立評論 vol.34. No.3 p.39 1952
- (6) P. M. Baker Electrical Engineering p.94 Jan. 1936
- (7) H. J. Vernon J. C. S. p.2273 1926
- (8) Van Brunt and R. H. Savage G. E. Review vol.47. p.16. 1944 July.
- (9) R. H. Savage G. E. Review vol.48. p.13 1945 Oct.
- (10) D. Ramadanoff and S. W. Glass A. I. E. E. vol.63 p.825 1944
- (11) H. M. Elsey A. I. E. E. vol.64. p.576 1945
- (12) H. M. Elsey A. I. E. E. vol.67. p.49 1948